

Economía circular para evaluar tecnologías para eliminar sílice coloidal en aguas de alimentar calderas en termoeléctricas

Circular economy for evaluating technologies to eliminate colloidal silica from boiler feedwater in thermoelectric plants

Gabriel Orlando Lobelles-Sardiñas^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2128-6146>

Daliana Cabezas-Rodríguez² <https://orcid.org/0009-0002-3942-476X>

Yanelain Martínez-Olmo³ <https://orcid.org/0000-0003-4009-1202>

¹Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba

²Empresa Termoeléctrica Cienfuegos (ETE). Cienfuegos. Cuba

³Departamento de química. Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo: globelles58@gmail.com

RESUMEN

En Cuba es imprescindible proyectar una estrategia que conduzca al modelo de producción de Economía Circular en sectores de la industria química y principalmente en centrales termoeléctricas, donde, el elevado consumo de agua técnica para la alimentación a calderas de vapor impacta los costos de producción sin que exista posibilidad de reutilización de dichas aguas. La presencia de sílice coloidal en aguas dulces representa uno de los desafíos más críticos en termoeléctricas de ciclo a vapor, por su capacidad de generar incrustaciones en calderas y depósitos en turbinas. Es objetivo del presente estudio: evaluar desde la perspectiva de la Economía Circular posibles tecnológicas para eliminar sílice coloidal en aguas de alimentar calderas en la Central Termoeléctrica de Cienfuegos. Este estudio integra un enfoque de Economía Circular del agua con un análisis comparativo multicriterio de tecnologías de tratamiento, demostrando que la ultrafiltración (UF) es la alterna alternativa óptima para la remoción de sílice coloidal previa a sistemas de desmineralización. Aplicando el método Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), es la alternativa óptima para la remoción de sílice coloidal previa a sistemas de

desmineralización. Aplicando el método Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), se evalúan criterios técnicos, económicos y ambientales que fundamentan la selección final. La propuesta permite alta eficiencia, reducción de purgas, menor huella ambiental y estabilidad operativa, alineándose con la circularidad del recurso hídrico y validando el segundo y tercer principio de la Economía Circular, demostrado mediante el índice de circularidad de Inédit e indicadores de Circular Trans. Posteriormente se realizó el estudio de viabilidad para la transferencia tecnológica.

Palabras clave: circularidad agua; ultrafiltración; reutilización; sílice coloidal.

ABSTRACT

In Cuba, it is essential to develop a strategy that leads to a circular economy production model in sectors of the chemical industry, and especially in thermoelectric power plants, where the high consumption of technical water for boiler feedwater impacts production costs without the possibility of reusing this water. The presence of colloidal silica in freshwater represents one of the most critical challenges in steam-cycle thermoelectric plants, due to its capacity to generate scale in boilers and deposits in turbines. The objective of this study is to evaluate, from a circular economy perspective, possible technological alternatives to eliminate colloidal silica from boiler feedwater at the Cienfuegos Thermoelectric Power Plant. This study integrates a circular economy approach to water with a multi-criteria comparative analysis of treatment technologies, demonstrating that ultrafiltration (UF) is the optimal alternative for the removal of colloidal silica prior to demineralization systems. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, technical, economic, and environmental criteria are evaluated to support the final selection. The proposed solution offers high efficiency, reduced purging, a smaller environmental footprint, and operational stability, aligning with the circularity of water resources and validating the second and third principles of the circular economy, as demonstrated by the Inédit circularity index and Circular Trans indicators. A feasibility study for technology transfer was subsequently conducted.

Keywords: water circularity; ultrafiltration; reuse; colloidal silica.

Enviado: 30/11/2025

Aceptado: 8/1/2026

Introducción

De acuerdo con el Informe de la Naciones Unidas sobre la escasez del agua, ⁽¹⁾ el 12 % de las reservas de agua dulce del planeta se consume en procesos industriales, destacándose en ellos las plantas termoeléctricas de ciclo a vapor. Los sistemas de generación de vapor requieren tratamiento previo al agua, pues esta presenta impurezas que pueden ser físicas, químicas o bacteriológicas, demandando en cada caso procedimientos diferentes para su purificación, según requerimientos de cada proceso. ⁽²⁾

Explica Gálvez, ⁽³⁾ que uno de los contaminantes más conocidos y agresivos en la generación de vapor es la sílice coloidal, debido a su alta estabilidad en suspensión, su movilidad en sistemas de membranas convencionales y su volatilización parcial en el ciclo de vapor. Estos contaminantes están presentes en las aguas dulces que llegan a la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos, generando depósitos en turbinas y superficies de intercambio térmico. ⁽⁴⁾

Dicha empresa cuenta con una Planta de Tratamiento Químico de Aguas (PTQA), encargada de realizar el tratamiento previo de purificación al agua para la alimentación de las calderas de alta presión, para ello tiene incluido el proceso de Intercambio Iónico. Esta es una tecnología consolidada en estos sistemas. ⁽⁵⁾ Sin embargo, este proceso no logra remover la sílice coloidal presente en el agua dulce, por lo que no favorece el uso y reuso de dichas aguas, entonces no se logra la circularidad del recurso hídrico.

Para ello se desarrollan tecnologías que garanticen los niveles de calidad de agua requerida en los procesos más exigentes y se estudian las metodologías de gestión de los residuos que permitan maximizar la cantidad de materia reutilizada o valorizada, frente a su depósito en vertederos.

Dentro de las primeras aparecen tecnologías que ofrecen una mayor flexibilidad y una alta calidad de agua pura, como es el sistema de separación por membranas de alta selectividad del medio filtrante. ⁽⁶⁾

Dentro de las segundas, se destaca la Economía Circular. Esta es un modelo que reemplaza el enfoque lineal de "producir, usar y desechar" por un ciclo continuo de aprovechamiento de recursos. Promueve la reutilización, el reciclaje y la regeneración de materiales, transformando los productos al final de su vida útil en recursos valiosos que pueden ser reintegrados al proceso productivo. ⁽⁷⁾

De acuerdo con Cerdá Tena, la Economía Circular se basa en tres principios,⁽⁸⁾ apoyados en el desafío de la innovación para poder lograr ser viable. El caso de estudio estará enfocado en el segundo y tercer principio, a saber:

- **Principio 2:** optimizar el rendimiento de los recursos, circulando siempre productos, componentes y materiales en su nivel más alto de utilidad, en los ciclos técnicos. Estos sistemas procuran extender más la vida del producto y optimizar la reutilización.
- **Principio 3:** promover la efectividad del sistema, proyectando eliminar las externalidades negativas. Ello incluye gestionar externalidades como en el caso de la contaminación del aire, el agua, la tierra y el cambio climático.⁽⁹⁾

En este contexto, la selección de una tecnología adecuada de pretratamiento es determinante para asegurar la calidad requerida del agua de calderas y para garantizar la eficiencia térmica del sistema. En tal sentido, es objetivo del trabajo: Evaluar desde la perspectiva de la Economía Circular posibles tecnologías para eliminar sílice coloidal en aguas para alimentar calderas en la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Luego de una amplia revisión bibliográfica se evaluaron seis alternativas tecnológicas para la solución del problema y lograr consigo la circularidad del agua técnica en el proceso de estudiado. Las alternativas evaluadas fueron:

- A1. Coagulación/floculación
- A2. Clarificación
- A3. Intercambio iónico
- A4. Microfiltración.
- A5. Ósmosis Inversa
- A6. Ultrafiltración.

Metodología de selección

Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

Para comparar las tecnologías se empleó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)⁽¹⁰⁾ estructurando el problema en tres ejes de desempeño (técnico, económico y ambiental). El objetivo global fue seleccionar la tecnología o combinación de tecnologías que maximice la remoción de sílice coloidal y el

desempeño ambiental, manteniendo la viabilidad técnica y económica. El análisis fue fundamentado a partir de la experticia de especialistas y literatura reciente que se describen a continuación:

Desempeño técnico: eficiencia de remoción de sílice coloidal, estabilidad operativa, compatibilidad con etapas posteriores (IEX. Intercambio Iónico).

Desempeño económico: CAPEX (*Capital Expenditures*), OPEX (*Operating Expenses*), consumo energético, vida útil y requerimientos químicos.

Desempeño ambiental: consumo de agua fresca, volumen de lodos generados, circularidad del agua, contribución a la economía circular.

Análisis de la factibilidad ambiental

Evaluación mediante el diagrama Sankey⁽¹¹⁾ de la circularidad del agua.

Cálculos de indicadores de la circularidad del agua (WCI).⁽¹²⁾ según las fórmulas siguientes:

$$WCI = \frac{Q \text{ Agua recuperada} + Q \text{ reusada}}{Q \text{ Agua entrada a proceso}} \quad (\text{Ec.1})$$

$$(\text{Circular Trans}): IC_{\text{agua}} = \frac{\text{Media de salidas circulares}}{\text{Media de entradas circulares}} \quad (\text{Ec.2})$$

$$\text{Proporción de agua reutilizada} = PAR = \frac{\text{Vol. total de agua reutilizada}}{\text{Vol. total de agua consumida en proceso}} \quad (\text{Ec.3})$$

Índice de circularidad del proceso, etapa posterior a la implementación.⁽¹³⁾, según: Rango: < 30% baja; 30 – 75% media; > 75% alta.

Análisis de viabilidad y Transferencia Tecnológica

Se implementó la metodología desarrollada por Castro, González y Guzmán,⁽¹⁴⁾ para evaluar la factibilidad de posible transferencia tecnológica. La metodología define un grupo de indicadores que facilitan la toma de decisiones en el proceso de transferencia de tecnologías y para facilitar la expresión de cálculo, se acompaña de las siguientes ecuaciones: (Ec.4); (Ec.5) y (Ec.6)

$$\text{Grado - Ponderación} = \sum_{i=1}^n Gi, \leq 100 \text{ puntos, } n=5 \quad (\text{Ec.4})$$

$$Gi = \frac{\sum Xg * Pg}{\sum Xg * Pg_{\text{máx}}} * 100 * PGi, i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (\text{Ec.5})$$

$$\sum PGi = 1 \quad (\text{Ec.6})$$

donde:

Xg: valor del indicador g.

Pg: índice ponderativo del indicador g

PGi: índice ponderativo del grupo.

Para la toma de decisiones sobre la transferencia a realizar la metodología comprende los valores mostrados en la tabla 1:

Tabla 1 - Valores a asumir según criterio de expertos.

Rango de valores	Significado
1 – 3	No debe ser transferida la tecnología
4 – 6	Necesita la mejora de mucho de sus elementos
7 – 8	Alta posibilidad para su transferencia
9 – 10	Excelente tecnología para transferir

Resultados y discusión

Análisis del desempeño técnico

A1. Coagulación/Floculación. Produce aglomeración parcial de partículas de sílice, pero depende fuertemente del tipo de sílice, pH y condiciones hidrodinámicas. No garantiza sílice < 0,5 mg/L ni estabilidad para alimentar sistemas de desmineralización modernos. ⁽¹⁵⁾

➔ Limitación principal: remoción insuficiente y alta variabilidad operativa.

A2. Clarificación. Eficaz para carbonatos y dureza, pero no rompe la estabilidad del coloide de sílice. Requiere grandes volúmenes de lodo. ⁽¹⁶⁾

➔ Limitación principal: no es un proceso selectivo para sílice coloidal.

A3. Intercambio iónico (IEX). Las resinas SBA no capturan sílice coloidal. Si el coloide no se elimina previamente, el IEX se satura muy rápido. ⁽¹⁷⁾

➔ Limitación principal: requiere un pretratamiento más eficiente como UF.

A4. Microfiltración (MF). Presenta un tamaño de poros de 0,1 – 10 µm. Separa partículas, coloides grandes, bacterias y levaduras. Se utiliza en tratamientos biológicos de aguas residuales.

A5. Ósmosis inversa (RO). Puede remover sílice molecular y parte del coloide, pero es altamente sensible a las incrustaciones por coloides. Requiere SDI < 3, condición que típicamente solo la UF cumple de manera estable.

➔ Limitación principal: no es pretratamiento, sino una etapa posterior.

A6. Ultrafiltración (UF)

La UF presenta múltiples ventajas para la remoción de sílice coloidal:

Corte típico 0,001 a 0,05, compatible con el tamaño del coloide.

Alta remoción de SDI (Índice de densidad de sedimentos), con valores <3.

Retiene partículas coloidales y materia orgánica asociada: estabiliza la sílice.

Operación estable con bajas variaciones en el permeado.

Modularidad y facilidad de automatización.

Eficiencia continua 90–99% en remoción coloidal.

Según Herman y Anderson, la UF es la etapa más robusta para garantizar una calidad estable previa a IEX, para la de generación de vapor de alta presión.⁽¹⁸⁾

➔ **Conclusión técnica:** la UF es la tecnología que mejor se ajusta al perfil de contaminantes y a la estabilidad operativa requerida.

❖ **Análisis del desempeño económico**

CAPEX. (Capital Expenditures) Gastos de Capital

UF tiene un CAPEX moderado comparado con otras tecnologías como Microfiltración y Osmosis Inversa.

Su modularidad permite ampliaciones y reduce el riesgo de inversión.

OPEX. (Operating Expenses) Gastos Operativos

Bajo consumo energético (0,1–0,3 kWh/m³).

Bajo uso de químicos; principalmente lavados esporádicos.

Larga vida útil de membranas (5–7 años).

Menor carga de incrustaciones para la IEX y reduce costos de limpieza.

La tabla 2 muestra una comparación resumen entre las tecnologías de acuerdo al análisis de desempeño económico.

Tabla 2 - Comparación entre tecnologías

Tecnología	CAPEX	OPEX	Observaciones
Coagulación	Bajo	Alto	Generación elevada de lodos
Clarificación	Medio	Alto	Requiere químicos y lodos voluminosos
Intercambio iónico	Medio	Alto	Regeneraciones frecuentes si entra sílice coloidal
Microfiltración	Alto	Medio	Alto consumo energético
Osmosis Inversa	Alto	Medio	Se usa después, no antes
Ultrafiltración	Medio	Bajo	Menos químicos, menos limpieza y alta vida útil

➔ **Conclusión económica:** UF es la solución con mejor equilibrio costo/beneficio para remoción de sílice coloidal y protección posterior.

Análisis del desempeño ambiental

La UF presenta ventajas ambientales claras:

Genera volúmenes mínimos de lodo (solo lavados químicos).

Permite aumentar la recuperación global del sistema de agua a 80–90%.

Reduce la captación de agua fresca y la descarga de purgas.

Presenta la menor huella energética entre las tecnologías avanzadas.

Es coherente con modelos de Economía Circular del agua, favoreciendo el cierre del ciclo y el reúso interno. ⁽¹⁹⁾

En comparación con coagulación o clarificación, que generan altos volúmenes de lodos y costos de disposición, la UF es la alternativa más limpia.

➔ **Conclusión ambiental:** UF es la tecnología que maximiza la circularidad y disminuye la huella ambiental total del proceso.

A partir de este análisis de desempeño se realiza la evaluación integral de las tecnologías, se selecciona la que mejor se ajusta al proceso estudiado y se propone su esquema tecnológico. La selección se fundamenta mediante el análisis de la factibilidad ambiental y de la factibilidad técnico-económica.

Se desarrolló un diagnóstico a la PTQA y se identificaron 24 deficiencias, entonces se realizó un análisis para definir las de mayor impacto. Dicha selección es la siguiente:

1. Presencia de salideros de agua en tuberías del sistema de tratamiento.
2. No existe criterio de uso y reúso del agua tratada, ni se miden sus impactos.
3. Existen pérdidas de aditivos o reactivos químicos.
4. Insuficiente capacitación de obreros que trabajan el tratamiento de agua.
5. Insuficientes medios de medición y control de los parámetros operacionales.
6. No están bien definidos los indicadores de eficiencia y eficacia del proceso.
7. Las resinas están desgastadas y requieren regeneración periódicamente.
8. No se ha priorizado el uso racional del agua en la generación de vapor.
9. Inexistencia de tecnología para eliminar la sílice coloidal de dichas aguas.
10. Equipos fuera de servicio o trabajan deficientemente.

Entonces, se realiza una votación ponderada, con la ayuda de expertos, para la priorización de causas, que permite, además, identificar y proponer medidas de mejoras para el proceso. En la tabla 3 se muestran los resultados:

Tabla 3 - Votación Ponderada.

PARTICIPANTES	PUNTUACIONES POR CAUSAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Votante 1	3		5		2				4	3
Votante 2	2		4			1		4	5	
Votante 3	3		4		1				5	5
Votante 4	1	2	3		2				5	
Votante 5	2	2					3		3	5
Suma	11	4	16	0	5	2	3	4	22	13
Frecuencia de puntuación	5	2	4	0	3	2	1	1	5	3
Orden de prioridad	4	6	2	10	5	9	8	7	1	3

Entonces resalta: Inexistencia de tecnología para eliminar la sílice coloidal de dichas aguas (causa 9). Esta causa requerirá la mayor atención. Por

consiguiente, se necesitaron propuestas de alternativas tecnológicas y su selección para la solución adecuada.

Evaluación integral y selección de alternativas. Método AHP

El método **AHP** permite comparar alternativas en función de criterios múltiples. La Estructura jerárquica del AHP utilizada se estructuró así:

Objetivo principal. Seleccionar la mejor alternativa tecnológica para remover sílice coloidal en una termoeléctrica.

Criterios evaluados. C1: Desempeño técnico.

C2: Desempeño económico (CAPEX + OPEX)

C3: Desempeño ambiental

Alternativas. A1: Coagulación. A2: Clarificación. A3: Intercambio iónico
A4: Microfiltración. A5: Ósmosis inversa. A6: Ultrafiltración (UF)

El desarrollo y la Conclusión del AHP se muestra en la tabla 4.

La ultrafiltración (UF) obtiene el puntaje más alto (0,89), muy por encima de las tecnologías competidoras. Desde un enfoque multicriterio, Ultrafiltración (UF):

- ofrece la mejor eficiencia técnica para remover sílice coloidal,
- presenta los menores costos operativos,
- aporta el mejor desempeño ambiental y de circularidad.

Por lo tanto, UF es la tecnología óptima y la selección está sólidamente justificada.

La figura 1 muestra un diagrama de flujo de proceso para la alternativa tecnológica seleccionada integrada al sistema de tratamiento de agua para la alimentación a caldera en la CTE. Se aplicará como un pretratamiento para lograr proteger las resinas de intercambio iónico.

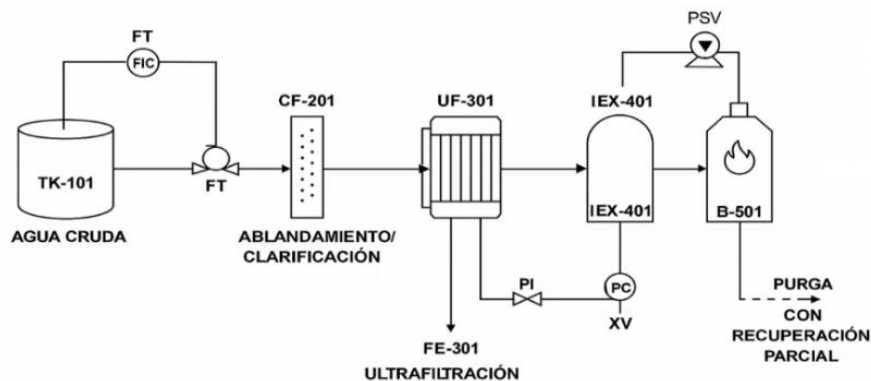


Fig. 1- Alternativa tecnológica seleccionada integrada al sistema de tratamiento

Tabla 4 - Desarrollo de la Matrix AHP por criterios de selección

C1 – Desempeño técnico

Alternativa	Remoción sílice coloidal	Estabilidad operativa	Compatibilidad postratamientos	Puntaje
A1: Coagulación	0,2	0,2	0,3	0,23
A2: Clarificación	0,1	0,2	0,2	0,17
A3: Intercambio iónico	0,3	0,4	0,5	0,40
A4: Microfiltración	0,5	0,5	0,4	0,47
A5: Ósmosis inversa	0,7	0,7	0,6	0,67
A6: Ultrafiltración	0,9	0,9	0,9	0,90

— UF es dominante por amplio margen.

C2 – Desempeño económico

Alternativa	CAPEX	OPEX	Puntaje
A1: Coagulación	Bajo	Alto	0,40
A2: Clarificación	Medio	Alto	0,35
A3: Intercambio iónico	Medio	Alto	0,32
A4: Microfiltración	Alto	Medio	0,45
A5: Ósmosis inversa	Alto	Medio	0,50
A6: Ultrafiltración	Medio	Bajo	0,80

— UF combina CAPEX moderado y OPEX bajo, lo que le otorga ventaja económica.

C3 – Desempeño ambiental (Impacto ambiental y circularidad)

Alternativa	Residuos	Energía	Huella hídrica	Puntaje
A1: Coagulación	Alto	Bajo	Medio	0,25
A2: Clarificación	Alto	Bajo	Medio	0,30
A3: Intercambio iónico	Medio	Medio	Medio	0,40
A4: Microfiltración	Medio	Alto	Medio	0,45
A5: Ósmosis inversa	Bajo	Alto	Bajo	0,60
A6: Ultrafiltración	Muy bajo	Bajo	Muy bajo	0,90

— UF destaca por bajo volumen de lodos, menor consumo energético y máxima circularidad.

Matriz de pesos de criterios

Criterio	Comparación técnica	Peso (%)
C1: Técnico	Dominante, pues la sílice coloidal exige tecnología robusta	0,55
C2: Económico	Es importante pero secundario	0,30
C3: Ambiental	Enfoque circular, pero subordinado al desempeño	0,15

Cálculo del puntaje global AHP

$$\text{Puntaje global} = (C1 \times 0,55) + (C2 \times 0,30) + (C3 \times 0,15) \quad (\text{Ec.7})$$

Alternativa	Puntaje Global
A1: Coagulación	0,28
A2: Clarificación	0,25
A3: Intercambio iónico	0,37
A4: Electrocoagulación	0,46
A5: Ósmosis inversa	0,63
A6: Ultrafiltración	0,89

Análisis de la factibilidad ambiental. Evaluación mediante el diagrama Sankey de la circularidad del agua

La figura 2 resume el esquema de circularidad del agua propuesto para el proceso de generación de vapor industrial, basado en el tren **Ablandamiento/Clarificación → Ultrafiltración (UF) → Intercambio iónico (IEX) → Caldera**, con reintegración parcial de la descarga (purga). Este modelo responde a las recomendaciones internacionales para la optimización del uso del agua en sistemas térmicos, particularmente en termoeléctricas. ^(20;21)

El flujo inicia con el agua cruda, sometida a ablandamiento o clarificación para remover dureza, sólidos suspendidos y partículas sedimentables. Es una práctica consolidada para prevenir el ensuciamiento en membranas y mitigar problemas de incrustación en sistemas posteriores. ⁽²²⁾

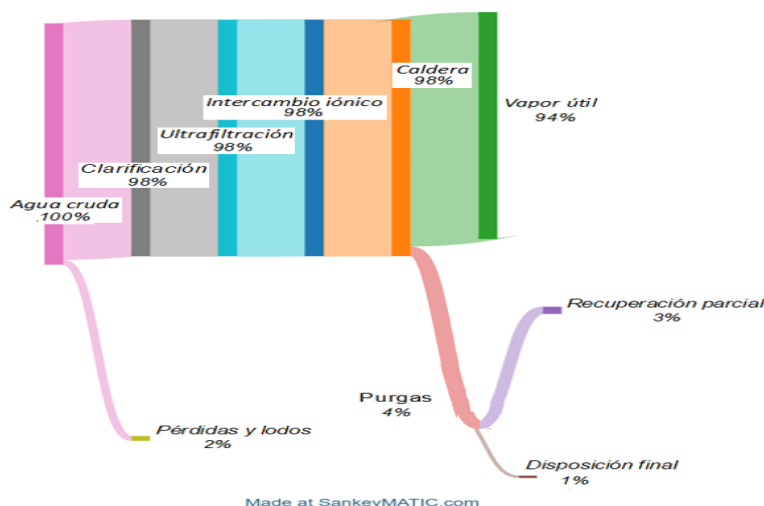


Fig. 2 - Diagrama Sankey del nuevo sistema de tratamiento de agua compuesto por las etapas de ablandamiento/clarificación, ultrafiltración, intercambio iónico y caldera

Posteriormente, el agua tratada ingresa a la unidad de ultrafiltración (UF), donde se remueven sólidos finos, coloides y fracciones de sílice coloidal. La UF actúa como barrera física avanzada y, en sistemas modernos, reduce la necesidad de clarificación química intensiva, disminuyendo el consumo de insumos y la generación de lodos. ⁽²³⁾ Entonces, el permeado de UF se alimenta al sistema de intercambio iónico (IEX), donde se logra la desmineralización profunda exigida por las calderas industriales. Esta etapa es sensible al ensuciamiento orgánico y particulado, por lo que la remoción previa en UF prolonga la vida útil de las resinas y reduce la frecuencia de regeneración. ⁽²⁴⁾

El agua desmineralizada resultante se dirige hacia la caldera, donde se transforma en vapor útil. De acuerdo con lineamientos técnicos y normas de control de pureza de agua para generación de vapor, ⁽²⁰⁾ una purga del 3–5% del caudal alimentado resulta necesaria para controlar la concentración de sólidos disueltos en el circuito. La figura 2 muestra que esta corriente residual constituye el principal punto de fuga del sistema.

En línea con los principios de la economía circular del agua promovidos por organismos internacionales, ^(25;26) el presente esquema permite reintegrar una fracción significativa del agua purgada de nuevo al proceso. Esta recirculación reduce la captación total de agua fresca, disminuye la carga hidráulica a sistemas de tratamiento final y contribuye a la sostenibilidad del sistema.

Este enfoque hidrométrico integrado, sustentado en tecnologías avanzadas como UF y estrategias de recuperación de corrientes internas, es consistente

con las mejores prácticas internacionales para sistemas industriales de uso intensivo de agua, maximizando la disponibilidad hídrica, la fiabilidad operativa y el desempeño ambiental. ^(4; 27)

❖ **Informe de circularidad de las aguas de alimentación a calderas.**

• **WCI – Water Circularity Indicator (Indicador de circularidad de agua)**

$$WCI = \frac{Q \text{ Agua recuperada} + Q \text{ reusada}}{Q \text{ Agua entrada a proceso}} = \frac{1\,176\,000 \text{ L/día} + 36\,000 \text{ L/día}}{1\,200\,000 \text{ L/día}} = 1,01 \% \quad (\text{Ec.1})$$

• **Índice de circularidad del agua (Circular Trans): IC_agua**

$$(\text{Circular Trans}): IC_{\text{agua}} = \frac{\text{Media de salidas circulares}}{\text{Media de entradas circulares}} = \frac{1\,176\,000 \text{ L/día}}{1\,200\,000 \text{ L/día}} = 0,98 \% \quad (\text{Ec.2})$$

• **Proporción de agua reutilizada (PAR):**

$$\text{Proporción de agua reutilizada} = PAR = \frac{\text{Vol. total de agua reutilizada}}{\text{Vol. total de agua consumida en proceso}} = \frac{36\,000 \text{ L/día}}{1\,176\,000 \text{ L/día}} = 3,06 \% \quad (\text{Ec.3})$$

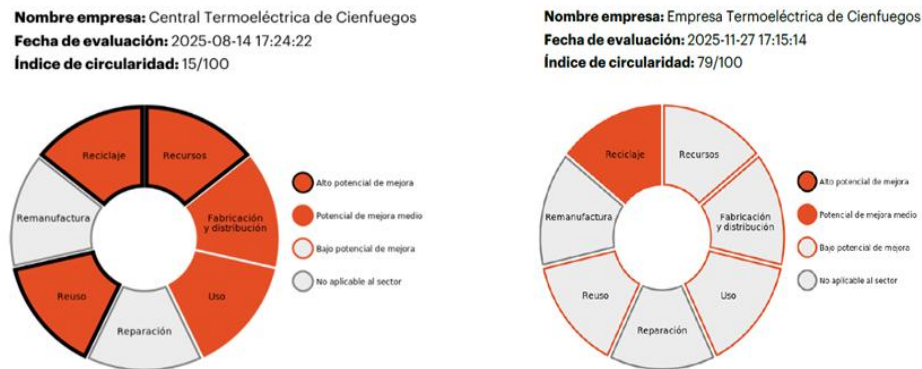


Fig. 3 - Índice de circularidad de PTQA según Inédit, antes y posterior a la implementación de la alternativa tecnológica

Los Indicadores de Circularidad del Agua (WCI) y los de **MET – Inédit**, cuyo modelo es centrado en: **M (Metabolismo)**: entradas/salidas de agua y energía; **E (Estrategias circulares)**: reducción, eficiencia, regeneración; **T (Transformación)**: cambios estructurales del sistema; demuestran fehacientemente que se ha logrado la circularidad hídrica en el proceso, donde **WCI = 1,01 % (Circularidad alta en el proceso según CTI v3)**

El análisis de la figura 3 muestra como en la PTQA se logra una circularidad ligeramente alta (79%), posterior a la incorporación de la alternativa tecnológica seleccionada. Este resultado es influenciado por el logro de la circularidad del agua en el proceso. Sin embargo, es evidente la necesidad de continuar trabajando en indicadores como reciclaje, donde existe un potencial de mejora medio, pero sobre todo en los indicadores de uso, reuso y recursos que,

aunque su potencial de mejora es bajo, pues estos aportan directamente al cumplimiento de los Indicadores de Transición Circular del proceso general. ⁽¹²⁾

Análisis de la factibilidad técnico-económica

Ventajas del proceso

La instalación de membranas de microfiltración, ósmosis inversa o ultrafiltración como pretratamiento delante de resinas de intercambio iónico disminuye considerablemente el costo global de operación, ya que reduce el consumo de reactivos y de agua desmineralizada requerido para regenerar la resina. Además, se prolonga su vida útil y el tiempo entre mantenimientos del sistema, aspecto de importancia económica a tener en cuenta.

Desventajas del proceso

Estas tecnologías presentan un alto consumo de energía eléctrica, debido a las bombas de alta presión que forman parte del proceso. No obstante, se puede optimizar el uso de la energía con el recuperador de energía o intercambiador de presión, lo que permite transmitir la energía residual de los desechos al agua de entrada en la planta, antes de ser arrojados al mar.

Costos según el fabricante

El costo de estas tecnologías varía entre 100 000 y 800 000 USD según el catálogo de fabricantes. Presentan un equipamiento completo que acompañan el módulo de membranas de ultrafiltración o microfiltración, entre ellos, la bomba de agua cruda multietapa y bomba de retrolavado, gajes de presión llenos de líquidos, medidor de presión, panel de control, válvula solenoide, soporte antideslizante, válvulas de tuberías, arrancadores de motor, etc.

Análisis viabilidad y Transferencia Tecnológica

Para decidir de forma general en correspondencia con el peso de todos los grupos (tabla 5 y figura 4), se determina la relación de:

Valor según criterio de experto = $(G1+G2+G3+G4+G5) / 5$ (Ec.8)

Valor según criterio de experto = $(9,1+9,5+9,3+9,2+9,7) / 5 = 9,36$

Tabla 5 - Grado de ponderación de los grupos de indicadores a escala de 0-10

Grupos	Gi	Coefficiente de correlación	Escala 0 - 10
Grupo I	19,45	0,5	9,1
Grupo II	18,42	0,5	9,5
Grupo III	18,70	0,5	9,3
Grupo IV	19,10	0,5	9,2
Grupo V	18,28	0,5	9,7
Grado de ponderación	93,95	0,5	46,8

Según los criterios de selección, el valor obtenido en el rango de 9-10 corresponde a excelente tecnología para transferir.

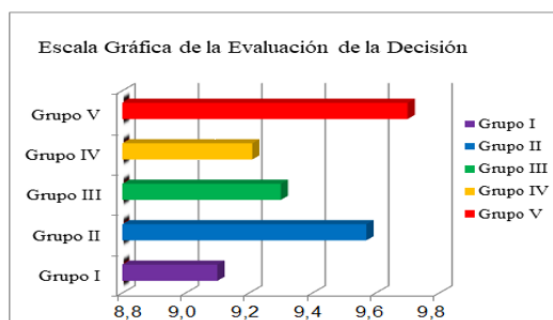


Fig. 4 - Escala gráfica de la evaluación de la decisión

Conclusiones

La evaluación integral desde la perspectiva de la Economía Circular, permitió, a partir de criterios técnico-económico-ambientales, la correcta selección de la tecnológica de ultrafiltración como la más adecuada para el tratamiento de las aguas de alimentar calderas en la termoeléctrica de Cienfuegos.

La tecnología de ultrafiltración integrada con intercambio iónico, propicia la eliminación de la sílice coloidal al agua desmineralizada de alta calidad para el uso en sistemas de generación de vapor y en consecuencia eleva la eficiencia del proceso general.

El nuevo esquema propuesto para el tratamiento de aguas para alimentar calderas de vapor, logra la circularidad del agua de proceso, disminuyendo el consumo general de agua y reactivos, así como, el impacto ambiental del proceso productivo.

Referencias bibliográficas

1. ONU-AGUA. Informe de la Organización de Naciones Unidas. *Escasez de Agua*. 2021. <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
2. MEJÍA, J. I. G. *Mantenimiento y optimización energética de una planta*. Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo. 2019.
<http://www.vaillant.es/tesisdemaster/JonathanIsrael/mantenimiento-optimizacion-energetica-de-una-planta/UNIVERSIDAD/OVIEDO/2019/pdf>
3. GÁLVEZ, J. J. O. *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Sociedad Geográfica de Lima. 2012. <http://ciclohidrologico.com/index.php/ciclohidroico-hrsg>
4. EPRI. *Guidelines for Membrane Treatment of Boiler Feedwater*. 2012.
5. ARONÉS-CISNEROS, A., LASHERAS-ADOT, M. E., & SANTAMARÍA-ULECIA, J. M. Resinas de intercambio iónico en cationes y aniones de aguas de lluvia en ecosistemas forestales. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*. 2024, **18**(2), 162–171. <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6160>
6. VWTS. (Veolia Water Technologies and Solutions). *Manual de tratamiento de aguas industriales*. Capítulo 09- Sistemas de membranas. 2025 <https://www.watertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment>
7. SUAZO-PÁEZ. *Economía Circular en Chile: Alcances, problemas y desafíos en la gestión de la ley REP. – PDF*. 2017. <https://docplayer.es/94038761-Economia-circular-en-chile-alcances-problemas-y-desafios-en-la-gestion-de-la-ley-rep.html>
8. CERDÁ-TENA, E. *Principios y características de la economía circular. Economía circular-espiral: transición hacia un metabolismo económico cerrado*. Departamento de Fundamentos del Análisis Económico e ICEI. 2019. Tesis de grado. Universidad Complutense de Madrid.
9. CERDÁ, E & KHALILOVA, A. *Economía circular*. *Economía industrial*. 2016, **401**(3), 11-20. ISSN 0422-2784. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/447151>
10. SAATY, T. L. *Fundamento axiomático del proceso analítico jerárquico*. *Management Science*. 1986, **32**(7),841-855. Scientific Research and Academic Publisher. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.7.841>
11. BOGART, S. Diagrama Sankey online para análisis de circularidad del agua. 2025. <https://sankeymatic.com/build/>

12. WBCSD. *Circular Transition Indicators: Guidance for the chemical industry to accelerate the deployment of circular metrics*. World Business Council for Sustainable Development. 2024. <https://www.wbcsd.org › resources>
13. INÉDIT. Autoevalúate con la herramienta de circularidad de Inédit. 2025. <https://circular.ineditinnova.com/>
14. CASTRO, N.; GONZÁLEZ, E. & GUZMÁN, F. Transferencia tecnológica, la integración ciencia, innovación tecnológica y medio ambiente en la empresa. *Ingeniería Industrial*. 2014,3(3), 277-288. ISSN 1815-5936. <https://www.redalyc.org › pdf>
15. MIRANDA-MANDUJANO E., SANDOVAL-YOVAL L., CALVO-BAZAN Y., MOELLER-CHÁVEZ G. E, SARRACINO-MARTÍNEZ O. Evaluación del proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de un efluente de la industria textil. *JEEOS*. 2017,1(3),43-54. <https://dialnet.unirioja.es › descarga › artículo>
16. SPELLMAN, F. R. *The science of water: Concepts and applications* (4th ed.). CRC Press. 2021.
17. AWWA. American Water Works Association. *Water quality & treatment: A handbook on drinking water* (6th ed.) 2019. McGraw-Hill Education.
18. HERNAN, J. & ANDERSON, B. *Silica in water supplies and its impact on boilers*. ASME Water Technologies. 2020.
19. LIBHABER, M. & OROZCO-JARAMILLO, Á. *Water reuse: An international survey*. IWA Publishing. 2023.
20. EPRI. *Water Chemistry Guidelines for Fossil Plants*. Electric Power Research Institute. 2010
21. API. *Water Management in the Petroleum Industry*. American Petroleum Institute. 2013.
22. ASTM. D1192-19: *Standard Guide for Equipment for Water Treatment*. 2019
23. WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Membrane Processes for Water Reuse*. 2016
24. API 939-I7: *Evaluation of Hydrocarbon Removal and Ion Exchange Resin Performance*. 2017
25. IPIECA. *Water Management in the Oil and Gas Industry: A Framework for Sustainability*. 2020.
26. UNESCO-WWDR. *United Nations World Water Development Report: Valuing Water*. 2021.

27. UNESCO-WWDR. United Nations World Water Development Report: Partnerships and Cooperation for Water. 2023

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores

Gabriel Orlando Lobelles Sardiñas: concepción y dirección de la investigación, análisis y escritura del artículo.

Daliana Cabezas Rodríguez: realizó el aporte y tratamiento de datos, análisis formal, validación.

Yanelain Martínez Olmo: análisis y revisión del artículo.